ChinaXiv合作期刊

氮肥配施生化抑制剂对黄泥田土壤钾素淋溶特征的影响

周旋[1,2], 吴良欢[1,2,3]

(1. 教育部环境修复与生态健康重点实验室/浙江大学环境与资源学院 杭州 310058; 2. 浙江省农业资源与环境重点实验室/浙江大学环境与资源学院 杭州 310058; 3. 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室/金正大生态工程集团股份有限公司)

摘 要: 我国南方黄泥田土壤中养分淋失严重，尤其是氮(N)和钾(K)，不仅造成资源浪费和潜在环境威胁，还严重制约作物的可持续生产。采用室内土柱模拟培养，研究尿素(U)和尿素硝铵(UAN)中单独添加脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)，及两者配合施用对黄泥田土壤中 K 素淋溶特征的影响，探讨提高黄泥田供钾能力的施肥技术。不同 N 肥种类淋溶液中，K^+平均浓度大小表现为 UAN 处理(103.0 mg·kg^{-1})高于 U 处理(93.9 mg·kg^{-1})，且抑制剂处理间存在明显差异。培养结束时(第 72 d)，UAN 处理 K^+淋失量较 U 处理高 6.7%。U 各处理淋溶液中 K^+累积量大小表现为 U>U+NBPT>U+NBPT+CP> U+CP>CK，其中 U+NBPT、U+CP 和 U+NBPT+CP 处理较 U 处理分别降低 8.7%、20.2%和 14.9%; UAN 各处理淋溶液中 K^+累积量大小表现为 UAN> UAN+NBPT> UAN+NBPT+CP> UAN+CP>CK，其中 UAN+NBPT、UAN+CP 和 UAN+NBPT+CP 处理较 UAN 处理分别降低 6.0%、13.8%和 9.2%。不同施肥处理 K^+淋溶率大小表现为 UAN>UAN+NBPT>U>UAN+NBPT+CP>UAN+CP>U+NBPT>U+NBPT+CP>U+CP。培养中期(第 36 d), U 和 UAN 处理肥际微域中土壤速效 K 含量显著降低，而添加 CP 处理有效维持土壤中较高的速效 K 含量。与单施 NBPT 相比，配施 CP 可以减少黄泥田土壤中 NO_3^-淋溶，增加土壤晶格对 K^+的固定，减轻 K^+淋溶风险，有效时间超过 72 d。对各处理淋溶液中 K^+累积量(y)随 NO_3^-累积量(x)的变化进行拟合，其中以线性方程($y=ax+b$)和 Elovich 方程($y=a\ln x+b$)的拟合度最高，且抑制剂处理间 a、b 值均存在明显差异。总之，在黄泥田土壤中单施 CP，或与 NBPT 配施可以有效增加 K^+吸附，降低土壤中 K^+淋溶损失，减轻养分淋失风险，提高肥料利用率。

关键词: K^+; 黄泥田土壤; 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT); 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP); 尿素; 尿素硝铵; 淋溶

中图分类号: S153.3 **文献标识码:** A **文章编号:**

Effects of nitrogen fertilization combined with biochemical inhibitors on leaching characteristics of soil potassium in yellow clayey soil*

ZHOU Xuan[1, 2], WU Lianghuan[1, 2, 3**]

(1. Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecosystem Health, Ministry of Education / College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment / College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization / Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd.)

Abstract: Soil nutrient leaching of yellow clayey soil, especially nitrogen (N) and potassium (K), is extremely serious in southern China. This resulted in not only resources waste and potential environmental threat, but also serious restriction of sustainable production of crops. In the present study, the effects of a urease inhibitor (N-(n-butyl) thiophosphoric triamide, NBPT), a nitrification inhibitor (2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine, CP) and their combined application on the leaching characteristics of soil potassium (K) in yellow clayey soil were investigated for improving the capability of soil K by fertilization, using an indoor soil column simulation with urea (U) and urea ammonium nitrate (UAN). In the leaching solution of different N fertilizers, the higher average K^+ concentration was obtained by UAN treatment (103.0mg/kg) than that of U treatment (93.9mg/kg), and there were obviously differences among inhibitor treatments. At the end of incubation (Day 72), UAN treatment increased K^+ leaching amount by 6.7% than that of U treatment. K^+ accumulation of leaching solution among U treatments was in the range of U > U+NBPT > U+NBPT+CP > U+CP > CK. Compared with U treatment, U+NBPT, U+CP and U+NBPT+CP treatment in K^+ accumulation were reduced by 8.7%, 20.2% and 14.9%, respectively. K^+ accumulation among UAN treatments was in the range of UAN > UAN+NBPT > UAN+NBPT+CP > UAN+CP > CK. Compared with UAN treatment, UAN+NBPT, UAN+CP and UAN+NBPT+CP treatment in K^+ accumulation were reduced by 6.0%, 13.8% and 9.2%, respectively. Additionally, the leaching rate of K^+ across different treatments was in the range of UAN > UAN+NBPT > U > UAN+NBPT+CP > UAN+CP > U+NBPT > U+NBPT+CP >

chinaXiv:201801.00057v1

U+CP. In the middle of incubation (Day 36), soil available K content of fertilizer microsites for U and UAN treatments decreased significantly. Addition of CP effectively maintained high available K content in topsoil. Compared with addition of NBPT alone, combined with CP can reduce NO_3^- leaching, and increase K^+ fixed by soil lattice, and mitigate the leaching risk of K^+ for more than 72 days in yellow clayey soil. Equation models were used to describe the relationship between K^+ accumulation (y) and NO_3^- accumulation (x) of leaching solution. The linear equation ($y = ax+b$) and Elovich equation ($y = a\ln x+b$) fit well, *a* and *b* values for inhibitor treatments were obviously different. In conclusion, application of CP alone or combined with NBPT in yellow clayey soil can effectively increase the adsorption of K^+, minimize soil K^+ leaching loss, mitigate the risk of nutrient leaching, and improve fertilizer utilization rate.

Keywords: K^+; Yellow clayey soil; Urease inhibitor; Nitrification inhibitor; N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT); 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine (CP); Urea; Urea ammonium nitrate; Leaching

chinaXiv:201801.00057v1

钾(K)是植物生长发育所必需的大量营养元素，在生长代谢中发挥着重要作用[1-2]。土壤缺 K 会造成作物因生理失调而减产[3]，施用 K 肥是缓解土壤 K 素亏缺的重要途径[4]。目前，我国已成为世界主要 K 肥消费国[5]，同时 K 肥资源匮乏[6]，进口量位居世界第一[7]。

黄泥田属于渗育型水稻土亚类，是我国南方稻区重要的中低产田之一[8]，面积约有 140 万 hm^2。其主要分布在山地丘陵坡上，以耕层浅薄、土质粘重、熟化度低为主要障碍特征[9]。黄壤成土母质为酸性结晶岩、砂岩等风化物及部分第四纪红色黏土，由于中度风化和强度淋溶，呈酸性至强酸性，pH 4.5~5.5；土壤交换性盐基含量最低，B 层盐基饱和度小于 35%[10]。可见，黄泥田土壤速效养分含量低，肥力低下，保肥性能差，盲目施肥易导致养分的大量损耗[11]。其中，缺 K 现象极其严重[12]。

影响 K 素淋溶的土壤性质主要有 pH[13]、土壤矿物类型[14]、交换性 K 含量[15]、质地[16]等。研究表明，偏酸性土壤中铝和羟基铝离子可占据 K^+的选择结合位，抑制土壤矿物对 K^+的吸附，使 K^+不易进入复合体而大部分留存在土壤溶液中，从而加剧淋失[17-18]。NH_4^+和 K^+的离子半径相近，会竞争土壤的吸附位点，施用氮(N)肥必然影响土壤对 K^+的吸附[13]。马茂桐等[19]研究发现，施用尿素促进红壤中 K^+的流失。杜振宇等[20-21]研究发现，铵钾肥共施显著提高肥际微域中的水溶态 K 含量，减少土壤晶格对 K 的固定。

相关研究报道，由于硝化抑制剂的施用显著降低土壤硝酸盐的淋溶损失，根据溶液等电荷平衡原理，一些土壤阳离子如 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}的淋溶损失也会相应降低[22-24]。同时，脲酶抑制剂可以抑制土壤中脲酶活性，减缓尿素态 N 水解为 NH_4^+-N[25]。目前，有关不同 N 肥种类对南方酸性土壤中养分淋失特征的影响研究较少，且主要集中在 N 素方面。而关于配施抑制剂对 K 素淋溶特征的影响研究未见报道。因此，采用室内模拟试验，开展不同 N 肥种类结合不同抑制剂组合对黄泥田土壤中 K 素淋溶特征的影响研究，以期为中低产田更优化的施肥管理措施提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为黄泥田水稻土，由第四纪红壤发育而成，于 2013 年 10 月采自浙江省金华市婺城区琅琊镇金朱村(29°01’19”N, 119°27’96”E)的 0~20 cm 耕层土壤。该地区地处金衢盆地东缘，属于中亚热带季风气候，海拔 86 m，年均降雨量 1 424 mm，年均气温 17.5 ℃。新鲜土样采回后剔除杂物及根系，风干后过 2 mm 筛备用。供试土壤基本理化性质为 pH(H_2O)5.24(土∶水=1∶1), CEC 7.32 cmol kg^{-1}，有机质 26.20 g kg^{-1}，全 N 1.25 g kg^{-1}，碱解 N 132.30 mg kg^{-1}, NH_4^+-N 53.40 mg kg^{-1}, NO_3^--N 17.81 mg kg^{-1}，有效磷 4.43 mg kg^{-1}，速效钾 79.00 mg kg^{-1}，砂粒 32.82%，粉粒 44.13%，黏粒 23.05%。

供试尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)、氯化钾(含 K_2O 60%)为分析纯，由国药集团化学试剂有限公司生产；尿素硝铵(含 N 32%)为分析纯，由中化作物营养有限公司生产；脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)24%乳油剂型为分析纯，由浙江奥复托化工有限公司生产。

1.2 试验装置

模拟土柱装置为内径 10 cm、高度 40 cm 的 PVC 圆柱管[26]，底部铺 2 cm 厚、粒径 1~2 mm 的干燥石英砂，管柱下开一个 2 cm 的孔，连接塑料管以便柱内渗滤液流出，管底及砂粒与土壤接触面分别铺一层 200 目的尼龙滤布。按照 1.25 g cm^{-3} 土壤容重将已处理好的风干土样装入 PVC 圆柱管中，形成高约 30 cm 的模拟土柱。

1.3 试验设计

试验于 2015 年 4—6 月在浙江省杭州市浙江大学紫金港校区实验室内进行，室内温度基本保持在 25~35 ℃，不种任何作物。试验共 2 组，每组设置 9 个处理，重复 3 次，如表 1 所示。装土柱时，将土壤分为两层装入, 0~10 cm 和 10~30 cm(从上到下)。尿素/尿素硝铵和生化抑制剂混匀，再与过磷酸钙和氯化钾同 0~10 cm 土壤充分混匀后，填装在土壤表面。N 用量为 300 kg hm^{-2}, P_2O_5 和 K_2O 用量均为 150 kg hm^{-2}。

表 1 不同氮肥配施生化抑制剂下土柱试验处理

Table 1 Experimental treatment of soil column

处理 Treatment	N 肥种类 N source	施 N 量 N rate (kg hm^{-2})	抑制剂 Inhibitor 类型 Type	添加量(以 N 为基础) Rate (%) N	施 K 量 K_2O rate (kg hm^{-2})	施 P 量 P_2O_5 rate (kg hm^{-2})
CK	CK		-	-	150	150
U	尿素 Urea	300	-	-	150	150
U+NBPT	尿素 Urea	300	NBPT	0.5	150	150
U+CP	尿素 Urea	300	CP	0.3	150	150
U+NBPT+CP	尿素 Urea	300	NBPT+CP	0.5+0.3	150	150
UAN	尿素硝铵 Urea ammonium nitrate	300	-	-	150	150
UAN+NBPT	尿素硝铵 Urea ammonium nitrate	300	NBPT	0.5	150	150
UAN+CP	尿素硝铵 Urea ammonium nitrate	300	CP	0.3	150	150
UAN+NBPT+CP	尿素硝铵 Urea ammonium nitrate	300	NBPT+CP	0.5+0.3	150	150

NBPT: N-丁基硫代磷酰三胺; CP:2-氯-6-(三氯甲基)吡啶. NBPT: N-(n-butyl) thiophosphoric triamide; CP: 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine.

1.4 试验方法

1.4.1 样品收集

土柱安装好后每天从顶部用注射器缓慢注入 200 mL 水(参照当地平均降雨量 25.5 mm)[26]。为接近自然降水状态，采用间歇淋溶法，让土壤有一定的反应时间。待有淋溶液流出，从第 6 d 开始模拟降雨，每隔 6 d 一次，每次 200 mL，尔后收集淋溶液，并记录淋溶液量，共 12 次。在试验开展的第 1 d、6 d、12 d、18 d、24 d、30 d、36 d、48 d、54 d、60 d、66 d、72 d 收集水样。第 36 d 和 72 d 时，各取 1 组土柱进行土样分层采集(0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm、20~25 cm、25~30 cm)共 6 层，为检测土壤剖面速效钾含量随土层深度的动态分布。

1.4.2 测定项目与方法

土壤基本理化性状采用常规方法测定[27]。在每次收取淋溶液后，将其充分混匀，测量淋溶液体积，采用火焰光度计法测定淋溶液中 K^+浓度，采用紫外分光光度法测定 NO_3^--N 浓度。每次淋溶量相加得到累积淋溶量。分层采集的土样立即用 1mol/L NH_4AC 浸提，采用火焰光度计法测定浸提液中 K^+浓度。

1.4.3 计算公式

K^+淋溶率(%)=(施 N 处理 K^+累积淋溶量-CK 处理 K^+累积淋溶量)/施 K 量×100%[29-30] (1)

1.5 数据分析

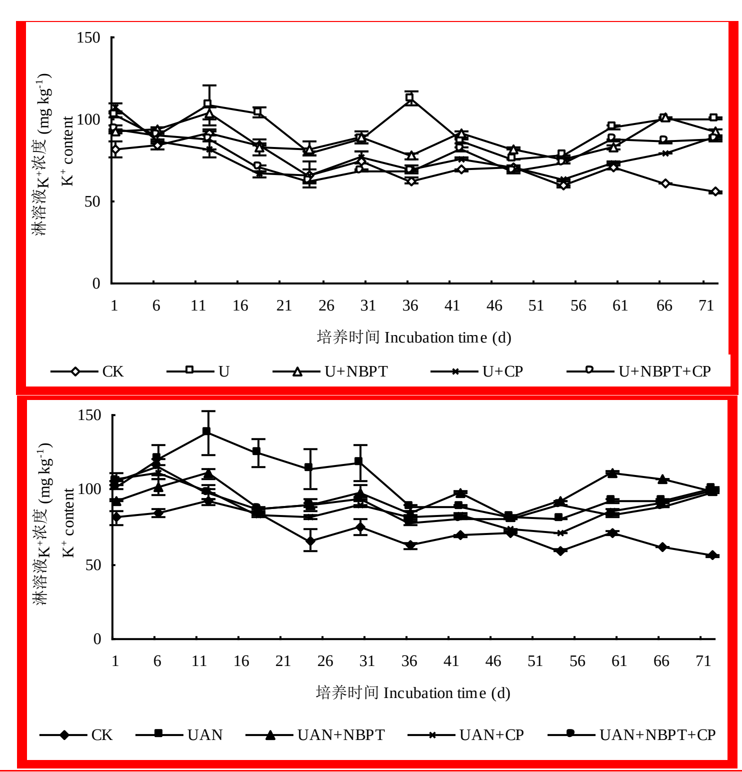
采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 数据分析软件进行统计分析，处理间差异显著性比较采用邓肯氏新复极差检验法。

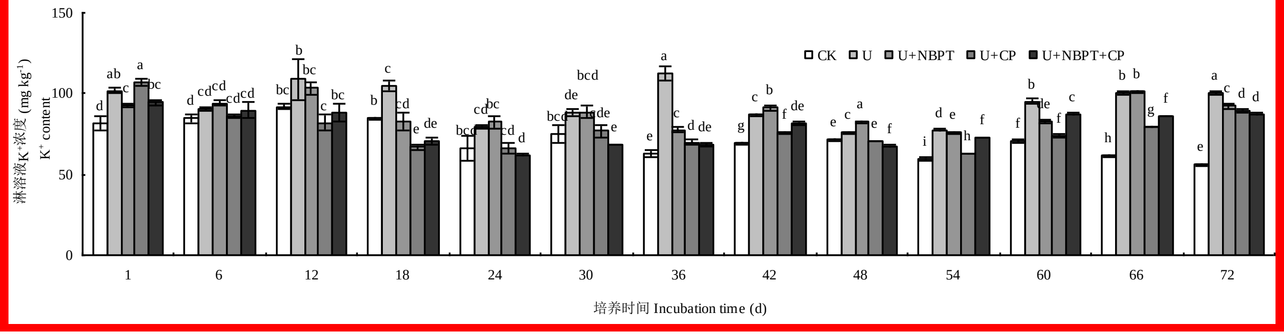
2 结果与分析

chinaXiv:201801.00057v1

2.1 氮肥配施生化抑制剂下淋溶液中 K⁺浓度

由图 1 可知，整个培养期间各处理淋溶液中 K⁺浓度变化总体保持平稳，CK 处理大小幅度处于 55.8~92.0 mg kg^{-1} 之间，U 各处理处于 62.0~112.3 mg kg^{-1} 之间，UAN 各处理处于 71.5~137.5 mg kg^{-1} 之间。不同 N 肥种类处理淋溶液中，K⁺平均浓度大小表现为 UAN 处理(103.0 mg kg^{-1})高于 U 处理(93.9 mg kg^{-1})，各抑制剂处理间存在差异。培养前期(第 18 d)，U 各处理淋溶液中 K⁺浓度(mg kg^{-1})大小表现为 U(104.3)> CK(84.50)> U+NBPT(82.8)> U+NBPT+CP(70.5)> U+CP(66.8)； UAN 各处理大小表现为 UAN(124.5)> UAN+NBPT(86.8)> UAN+NBPT+CP(86.5)> CK(84.50)> UAN+CP(82.5)。说明培养期间，不同种类 N 肥施用会加剧 K⁺的淋失，其中以 UAN 处理较高；添加抑制剂可以有效缓解 K⁺淋失风险，其中以 CP 处理效果较好。





chinaXiv:201801.00057v1

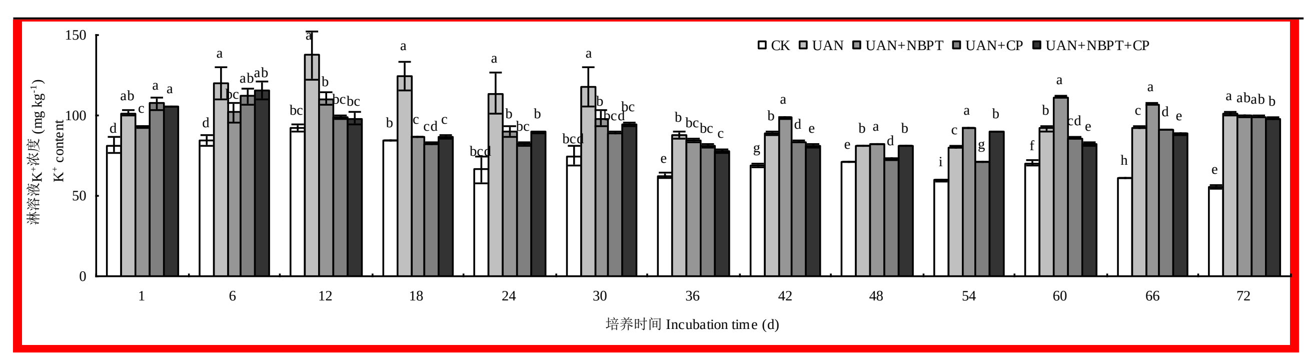


图 1　不同处理下淋溶液中 K⁺浓度

Fig. 1　K⁺ concentration in the leaching solution under different treatments

2.2　氮肥配施生化抑制剂下淋溶液中 K⁺累积量

由图 2 可知，整个培养期间各处理淋溶液中 K⁺累积量变化总体呈上升趋势。随着时间的延长，处理间差异变大。培养中期(第 36 d), UAN 处理 K⁺淋失累积量较 U 处理增加 9.9%。U 各处理淋溶液中 K⁺累积量大小表现为 U> U+NBPT> U+NBPT+CP> U+CP> CK，其中 U+NBPT、U+CP 和 U+NBPT+CP 处理较 U 处理分别降低 12.5%、22.3%、22.7%；UAN 各处理大小表现为 UAN > UAN+NBPT+CP > UAN+CP > UAN+NBPT > CK，其中 UAN+NBPT、UAN+CP 和 UAN+NBPT+CP 处理较 UAN 处理分别降低 15.20%、15.17%、12.54%。培养结束(第 72 d), UAN 处理 K⁺淋失累积量较 U 处理增加 6.7%。U 各处理淋溶液中 K⁺累积量大小表现为 U> U+NBPT> U+NBPT+CP> U+CP> CK，其中 U+NBPT、U+CP 和 U+NBPT+CP 处理较 U 处理分别降低 8.7%、20.2%、14.9%；UAN 各处理大小表现为 UAN > UAN+NBPT > UAN+NBPT+CP > UAN+CP > CK，其中 UAN+NBPT、UAN+CP 和 UAN+NBPT+CP 处理较 UAN 处理分别降低 6.0%、13.8%、9.2%。说明添加 CP 和 NBPT 可以有效降低黄泥田土壤中 K⁺的淋溶损失，且 U 处理配施 CP 较 UAN 处理作用效果更好，可能与尿素水解过程及肥料 N 素形态变化有关。

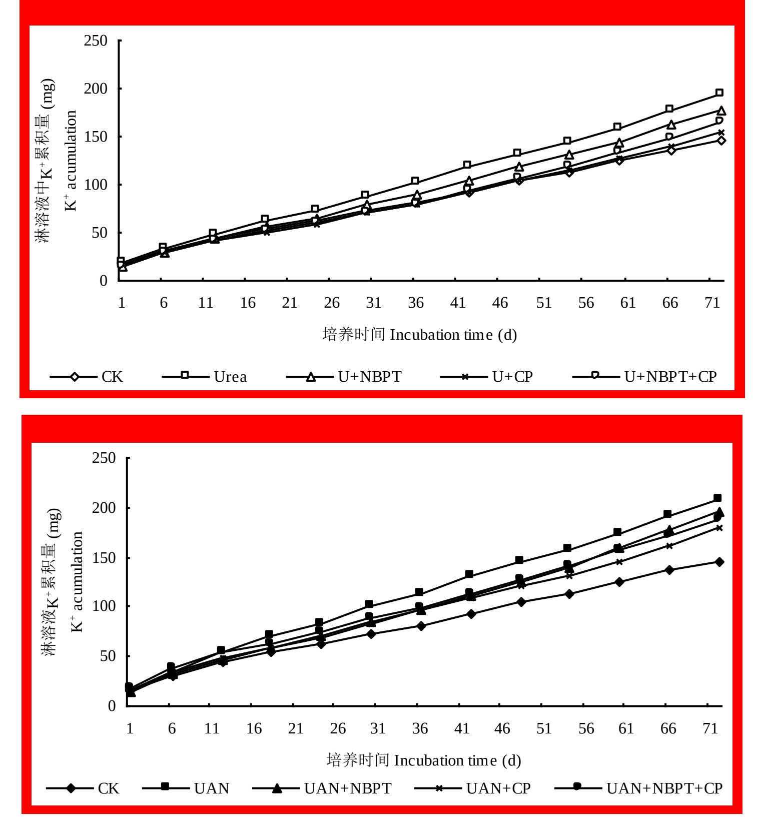


图 2　不同处理下淋溶液中 K⁺累积淋失量

Fig. 2　K⁺ accumulation in the leaching solution under different treatments

chinaXiv:201801.00057v1

chinaXiv:201801.00057v1

2.3 氮肥配施生化抑制剂下 K^+淋溶率

由图 3 可知，培养结束(第 72 d), UAN 处理(13.67%)K^+淋溶率较 U 处理(10.79%)增加 26.7%。U 各处理 K^+淋溶率大小表现为 U> U+NBPT> U+NBPT+CP> U+CP, 其中 U+NBPT、U+CP 和 U+NBPT+CP 处理较 U 处理分别显著降低 34.6%（P<0.05）、80.6%（P<0.05）、59.7%（P<0.05）；UAN 各处理大小表现为 UAN> UAN+NBPT> UAN+NBPT+CP> UAN+CP, 其中 UAN+NBPT、UAN+CP 和 UAN+NBPT+CP 处理较 UAN 处理分别降低 20.1%、46.3%（P<0.05）、31.0%（P<0.05）。说明添加 CP 和 NBPT 可以显著降低黄泥田土壤中施肥后 K^+的淋溶损失，且 U 添加 CP 较 UAN 作用效果更好。

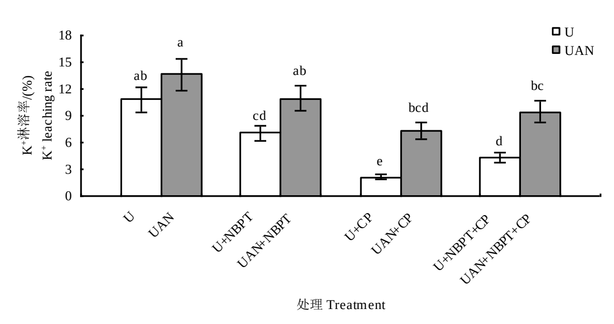


图 3 不同处理下淋溶液中 K^+淋溶率

Fig. 3 K^+ leaching rate in the leaching solution under different treatments

注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5%显著水平. Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% levels.

2.4 不同处理 K^+与 NO_3^-淋溶特征曲线拟合

由图 4 可知，土柱淋溶液中 NO_3^-淋失累积量整体上呈上升趋势。CK 处理呈较低水平，整个培养期间平稳增加，无较大波动。U 和 UAN 淋溶液中 NO_3^-淋失累积量前期增长缓慢，分别于第 42 天和第 24 天开始急剧增加。

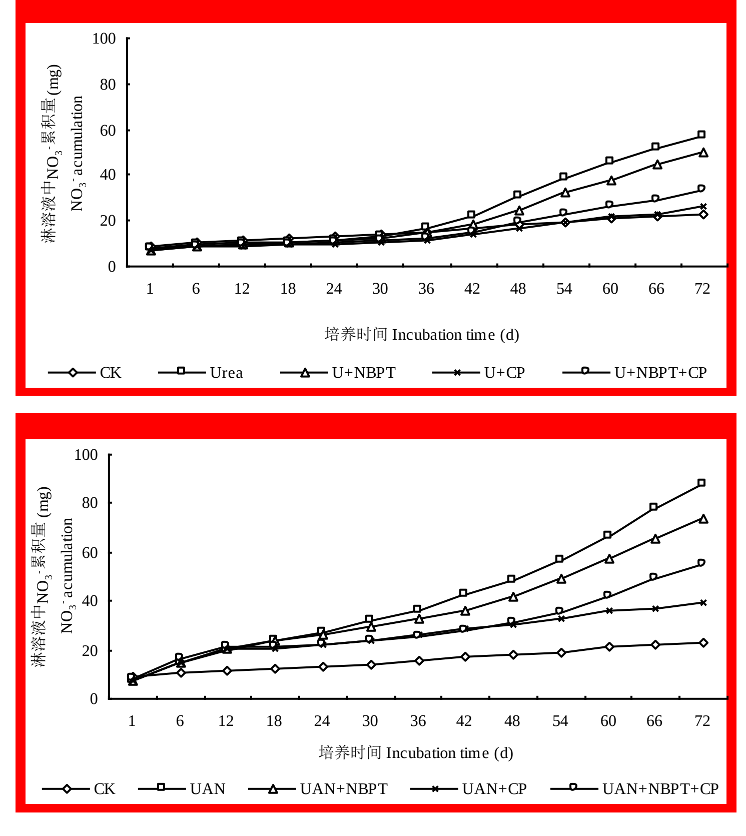


图 4 不同处理下淋溶液中 NO_3^-淋失累积量

Fig. 4 NO_3^- accumulation in the leaching solution under different treatments

对黄泥田土壤各处理淋溶液中 K^+ 累积量(*y*)随 NO_3^- 累积量(*x*)的变化，分别以 $y = ax+b$、$y = a\ln x+b$、$y = ax^b$、$\ln y = ax+b$ 方程进行回归分析(表 2)。各拟合方程 R^2 值均达到极显著水平(P<0.01)，说明各处理 K^+ 淋溶量均随 NO_3^- 淋溶量的增加而增加。对于 U 和 UAN 处理均以直线方程 $y = ax+b$ 拟合效果较好，说明 $y = ax+b$ 能较好地描述 K^+ 淋溶量随 NO_3^- 淋溶量的动态变化特征。其中，*a* 表示 K^+ 随 NO_3^- 变化的速率。U 各处理 a 值大小表现为 U < U+NBPT < U+NBPT+CP < U+CP; UAN 各处理大小表现为 UAN < UAN+NBPT< UAN+NBPT+CP < UAN+CP。*b* 表示 K^+ 初始淋溶量。U 各处理 *b* 值大小表现为 U> U+NBPT> U+NBPT+CP> U+CP; UAN 各处理大小表现为 UAN > UAN+NBPT > UAN+NBPT+CP > UAN+CP。说明黄泥田土壤中 K^+ 淋失与 NO_3^- 密切相关；添加抑制剂可以维持土壤中 N 素的存在形态，改变 NO_3^- 的存在时间，从而影响 K^+ 的吸附与解析。

表 2　不同处理 K^+ 淋失量(*y*, kg ·hm^{-2})与 NO_3^- 淋失量(*x*, kg ·hm^{-2})的拟合方程

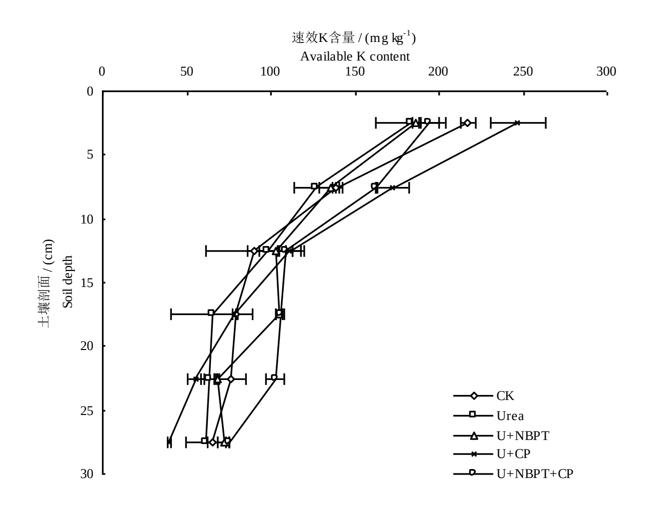
Table 2　The fitting equations between the leaching amounts of K^+ (*y*, kg ·hm^{-2}) and NO_3^- (*x*, kg ·hm^{-2})

处理	*y=ax+b*			*y=a*ln*x+b*			*y=ax^b*			ln*y=ax+b*		
Treatment	*a*	*b*	R^2	*a*	*b*	R^2	*a*	*b*	R^2	*a*	*b*	R^2
CK	8.9	-58.0	0.99**	136.6	-289.0	0.99**	0.3	2.1	0.94**	0.1	9.2	0.86**
U	3.0	28.4	0.90**	77.7	-129.0	0.96**	5.9	0.9	0.80**	0.0	38.1	0.66**
U+NBPT	3.3	22.1	0.90**	75.7	-123.8	0.98**	4.5	1.0	0.80**	0.0	32.2	0.64**
U+CP	6.1	-7.3	0.92**	92.7	-158.0	0.97**	2.1	1.4	0.83**	0.1	20.1	0.72**
U+NBPT+CP	5.2	-1.0	0.94**	92.4	-162.3	0.98**	2.5	1.3	0.83**	0.1	23.5	0.71**
UAN	2.4	14.2	0.96**	84.2	-183.5	0.96**	2.4	1.0	0.97**	0.0	31.7	0.77**
UAN+NBPT	2.8	-2.9	0.99**	85.1	-192.3	0.92**	1.5	1.2	0.99**	0.0	23.6	0.83**
UAN+CP	5.3	-41.8	0.97**	98.3	-216.1	0.82**	0.8	1.5	0.97**	0.1	12.3	0.96**
UAN+NBPT+CP	3.9	-10.5	0.94**	102.4	-232.2	0.92**	1.2	1.3	0.95**	0.0	23.7	0.80**

注(Note):**—P < 0.01.

2.5　土壤剖面速效 K 分布

由图 5 可知，黄泥田土壤肥际微域中不同处理速效 K 含量在 0～30 cm 土层均随距施肥点距离增加而逐渐降低，K^+ 在表层土(0~10 cm)中迁移速度较快。U 和 UAN 处理培养期间较 CK 处理促进 K^+ 的垂直迁移。培养中期(第 36 d), U 处理 0~5 cm 土层速效 K 含量较 UAN 处理高 9.20%。U 各处理 0~5 cm 速效 K 含量大小表现为 U+CP> U+NBPT+CP> U+NBPT> U，其中 U+NBPT、U+CP 和 U+NBPT+CP 处理较 U 处理分别提高 1.96%、35.01%、6.17%; UAN 各处理大小表现为 UAN+CP > UAN+NBPT > UAN+NBPT+CP> UAN，其中 UAN+NBPT、UAN+CP 和 UAN+NBPT+CP 处理较 UAN 处理分别提高 27.14%、28.67%、24.66%。说明添加 CP 和 NBPT 可以维持黄泥田土壤中有效 K 的含量，且 U 中添加抑制剂较 UAN 作用效果更好，可能与尿素水解时间有关。



chinaXiv:201801.00057v1

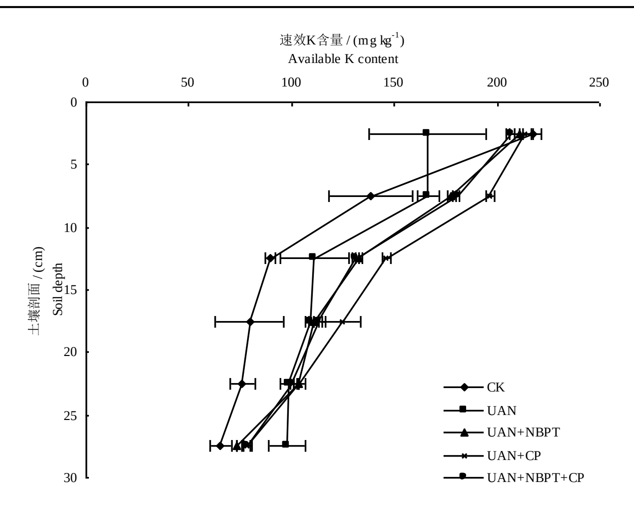


图 5　K^+在黄泥田土壤肥际微域中的迁移量

Fig. 5　Movement amount of K^+ applied in fertilizer microsites in yellow clayey soil

3　讨论

3.1　N 肥种类对土壤 K 素淋溶的影响

林清火等[31]研究发现, N 肥种类对砖红壤盐基离子淋失的影响表现为硫酸铵>硝酸铵>尿素。罗微等[30]通过盆栽试验研究发现，不同 N 肥种类的砖红壤淋溶液中, K^+浓度及累计淋溶量大小表现为复混肥 b>碳铵≈尿素>复混肥 a。余泺等[28]研究发现，盐基离子淋溶总量(kg hm^{-2})表现为硫酸铵(1821.12)>硝酸铵(1080.27)>尿素(872.24)>N0(417.23); 迁移速率表现为硫酸铵(26.28%)>硝酸铵(13.37%)>尿素(11.78%)。本研究结果与前人[28]研究结果相似，不同 N 肥种类处理对 K^+在黄泥田土壤中淋溶特征的影响较大。培养期间 K^+平均浓度表现为 UAN>U。培养结束(第 72 d), UAN 处理 K^+淋失量和淋溶率均高于 U 处理，说明 K^+在黄泥田土壤中淋溶特征与肥料中 N 素存在形态有关。每 1 mol NH_4^+转化为 NO_3^-释放出 4 mol 的 H^+, NH_4^+-N 较尿素施入土壤产生更强的酸化作用，H^+越多越易将土壤胶体上的盐基离子替换[28]。UAN 中含大部分 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 较尿素更直接与土壤作用。培养期前 18 d 内, K^+淋溶量随时间的推移缓慢上升，且处理间差别不大; 之后，各处理淋溶液中 K^+累积量迅速增加，曲线斜率不断增大，淋溶速率加快(图 2)，与尿素水解过程有关[25]。尿素经脲酶水解为 NH_4^+-N，再通过硝化作用转化为 NO_3^--N，作用过程需要一定的时间。

3.2　抑制剂对土壤 K 素淋溶的影响

NO_3^--N 在土壤中不易被胶体吸附、移动性强，成为 N 素淋失的主要形式; NH_4^+-N 在土壤中易被胶体吸附和被矿物晶格固定，其淋溶损失不如 NO_3^--N 强烈，但由于土壤胶体吸附阳离子的能力有限，当施肥量超过吸附容量时, NH_4^+-N 也存在明显的淋溶损失[31, 36]。NH_4^+与 K^+有几乎相同的离子半径和水化能，会被黏土矿物晶格固定。由于 NH_4^+与 K^+竞争固定位点，其存在可能改变 K^+的固定及释放特征[37]。Di 等[38-39]研究发现，硝化抑制剂减少草地土壤中阳离子(如 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+})的淋失，而 NO_3^-浓度与阳离子总量呈线性关系。本研究结果表明，添加抑制剂可以有效维持土壤中较高的速效 K 含量，减缓土层中 K^+向下迁移，并提高土壤表层 K 素有效性，与 NO_3^-淋失特征有关(表 2)。NBPT 延缓尿素水解，CP 有效降低 NO_3^-的淋失，且两者配施具有一定协同抑制效应[25]。各处理 K^+淋溶率大小表现为 UAN> UAN+NBPT> U> UAN+NBPT+CP> UAN+CP> U+NBPT> U+NBPT+CP> U+CP。添加 CP 有效降低淋溶液中 K^+浓度及累积量，而添加 NBPT 较 CP 对淋溶液中 K^+的影响较小。在一定施肥量条件下，单施 CP 或与 NBPT 配施均可显著降低黄泥田土壤中 K^+淋失量，减轻养分淋失风险。

3.3　黄泥田土壤 K 素淋溶特征

研究表明, N 肥用量、降雨量、气温以及土壤性质均会影响 K 素的移动与淋失[13, 32]。占丽平等[33]研究认为，土壤黏粒含量越高，吸持 K^+数量越多，阻滞因子与各土层黏粒含量呈极显著线性关系。酸性土壤为高度风化的淋溶土纲，黏粒含量较高，土壤颗粒所吸附或固定的 K^+在淋溶初期较多被交换淋溶[34]，又随着施肥淋溶的不断进行, H^+不断积累，土壤电化学平衡被打破后, K^+与土壤的结合能量随 pH 降低而急剧减少，使淋溶后期 K^+释放加剧[28]。杜振宇等[20]研究发现，随着培养时间增加，NH_4^+在土壤中逐渐被硝化减少，所

chinaXiv:201801.00057v1

产生的 H^+相应增多，其吸附能力较大，对 K^+的交换能力要强于 NH_4^+。林清火等[35]研究发现，NO_3^-淋溶量与盐基离子的耦合性较好，随着 NO_3^-淋失量的增加，盐基离子淋失量增大；砖红壤上盐基离子随 NO_3^-的迁移速率表现为硫酸铵＞硝酸铵＞尿素。南方黄泥田的主要特征是土壤熟化度低、有机质缺乏、有效磷钾低、酸性强以及耕性不良[40-41]。在盈余条件下，由于红壤性稻田主要以非胀缩性的高岭土矿物为主，固钾能力较低[40]，增加的水溶性钾或交换性钾离子难以进入矿物层间而被固定。本研究结果表明，黄泥田土壤中，U 和 UAN 处理肥际微域中土壤速效 K 含量显著降低，减少土壤晶格对 K^+的固定；H^+的存在和 NO_3^-的淋失导致土壤对 K^+的吸持比例减小，加大 K^+淋溶风险。土壤 K^+的淋失与土壤 NO_3^-淋失具有耦合迁移特征。

4 结论

本试验条件下，不同施 N 处理 K^+ 淋溶率大小表现为 UAN>UAN+NBPT>U>UAN+NBPT+CP>UAN+CP>U+NBPT>U+NBPT+CP> U+CP。不同 N 肥种类处理淋溶液中 K^+累积量(y)随 NO_3^-累积量(x)的变化特征均可用线性方程和 Elovich 方程进行描述。在黄泥田土壤中单施 CP，或与 NBPT 配施可以有效增加 K^+吸附，降低土壤中 K^+淋溶损失，减轻养分淋失风险，提高肥料利用率。目前的试验结果是在室内模拟下，没有作物吸收养分的前提下所得出的结论，NBPT+CP 组合在黄泥田中实际施用效果需要进行田间试验进一步研究。

参考文献 References

[1] Singh B, Singh Y, Imas P, et al. Potassium nutrition of the rice-wheat cropping system[J]. Advances in Agronomy, 2004, 81(03): 203-259.

[2] Ashley M K, Grant M, Grabov A. Plant responses to potassium deficiencies: a role for potassium transport proteins[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(2): 425-436.

[3] 熊明彪，雷孝章，田应兵，等. 钾离子在土壤中吸附和解吸动力学研究进展[J]. 生态环境学报, 2003, 12(1): 115-118.

Xiong M B, Lei X Z, Tian Y B, et al. Research progress of K^+ adsorbing-desorbing kinetics in soils[J]. 2003, 12(1): 115-118.

[4] 王亚艺，鲁剑巍，肖荣英，等. 湖北省两个生态区水稻施钾效果及农田钾素平衡研究[J]. 土壤, 2010, 42(3): 473-478.

Wang Y Y, Lu J W, Xiao R Y, et al. Study on effects of potassium (K) fertilizer on rice and K balance of paddy fields in different types of ecoregions of Hubei Province[J]. Soils, 2010, 42(3): 473-478.

[5] 孙爱文，张卫峰，杜芬，等. 中国钾资源及钾肥发展战略[J]. 现代化工, 2009, 29(9): 10-14.

Sun A W, Zhang W F, Du F, et al. China’s development strategy on potash resources and fertilizer[J]. Modern Chemical Industry, 2009.

[6] 郑诗樟，胡红青，庄光泉. 施用不同钾肥对土壤钾的转化和植物钾有效性影响机理的研究进展[C]// 中国土壤学会海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会. 2008.

[7] 钱伯章. 10 年内我国将成为钾肥净出口国[J]. 化肥工业, 2009(6): 45.

[8] 李清华，王飞，林诚，等. 长期施肥对黄泥田土壤微生物群落结构及团聚体组分特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1599-1606.

Li Q H, Wang F, Lin C, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial community structure and aggregate composition in yellow clayey paddy field[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(6): 1599-1606.

[9] 荣勤雷，梁国庆，周卫，等. 不同有机肥对黄泥田土壤培肥效果及土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2014, 20(5): 1168-1177.

Rong Q L, Liang G Q, Zhou W, et al. Effects of different organic fertilization on fertility and enzyme activities of yellow clayey soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(5): 1168-1177.

[10] 余泺. 施氮对可变电荷土壤中硝酸根离子和盐基离子耦合迁移的影响[D]. 西南大学, 2012.

Yu L. Effect of nitrogen application on coupling leaching of nitrate nitrogen and base cations in variable charge soil[D]. Southwest University, 2012.

[11] 刘彦伶. 南方中低产黄泥田改良和产量提升技术研究[D]. 浙江大学, 2013.

Liu Y L. Study on the technology of soil and grain yield improvement for low-medium yielding yellow-clayed paddy field in south China[D]. Zhejiang University, 2013.

[12] 张宣. 南方中低产黄泥田科学施肥技术研究[D]. 浙江大学, 2014.

Zhang X. Study on rational fertilization technology of low-medium yielding yellow-clayed paddy field in south China[D]. Zhejiang University, 2014.

[13] 和林涛，石孝均，易时来. 不同氮处理下紫色土钾素淋失动态研究[J]. 西南大学学报自然科学版, 2007, 29(7): 96-101.

He L T, Shi X J, Yi S L. Study on dynamics of potassium leaching loss in purple soils under different nitrogen fertilizer treatments[J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2007, 29(7): 96-101.

chinaXiv:201801.00057v1

[14] 黄绍文，金继运. 我国北方一些土壤对外源钾的固定[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, (2): 131-138.
[15] Askegaard M, Eriksen J, Olesen J E. Exchangeable potassium and potassium balances in organic crop rotations on a coarse sand[J]. Soil Use and Management, 2003, 19(2): 96-103.
[16] Rosolem C A, Sgariboldi T, Garcia R A, et al. Potassium leaching as affected by soil texture and residual fertilization in tropical soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41(16): 1934-1943.
[17] 李小坤，鲁剑巍，吴礼树，等. 水旱轮作下根区与非根区黄褐土钾素动态研究[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(4): 850-856.
Li X K, Lu J W, Wu L S, et al. Potassium dynamics in root-zone and non root-zone in yellow cinnamon soil with paddy-rapeseed rotation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(4): 850-856.
[18] 闫良，茶正早，罗微，等. 3 种母质砖红壤中钾素垂直运移特征初步研究[J]. 热带作物学报, 2012, 33(10): 1749-1757.
Yan L, Cha Z Z, Luo W. Vertical leaching character of K^+ in soils developed from 3 parent rocks[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(10): 1749-1757.
[19] 马茂桐. 钾氮配施对土壤氮钾渗漏损失的影响[J]. 土壤, 1999, 31(3):136-139.
[20] 杜振宇，周健民，王火焰，等. NH_4^+对 K^+在土壤肥际微域中迁移和转化的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 492-498.
Du Z Y, Zhou J M, Wang H Y, et al. Effect of NH_4^+ on movement and transformation of K^+ in fertilizer microsites in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 492-498.
[21] 杜振宇，周健民. 钾在红壤肥际微域中的迁移[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 1035-1039.
Du Z Y, Zhou J M. Movement of potassium in fertilizer microsites in red earth[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(6): 1035-1039.
[22] Wu S F, Wu L H, Shi Q W, et al. Effects of a new nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on nitrate and potassium leaching in two soils [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19: 841-847.
[23] 孙志梅，武志杰，陈利军，等. 土壤硝化作用的抑制剂调控及其机理[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1389-1395.
Sun Z M, Wu Z J, Chen L J, et al. Regulation of soil nitrification with nitrification inhibitors and related mechanisms[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1389-1395.
[24] Yu Q G, Ye X Z, Chen Y X, et al. Influences of nitrification inhibitor 3, 4 -dimethylpyrazole phosphate on nitrogen and soil saltion leaching[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(3): 304-308.
[25] 周旋，吴良欢，戴锋. 生化抑制剂组合对黄泥田土壤尿素态氮转化的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 95-100.
Zhou X, Wu L H, Dai F, et al. Effects of biochemical inhibitors on transformation of urea nitrogen in yellow clayey soil[J]. 2015, 29(5): 95-100.
[26] 高德才，张蕾，刘强，等. 生物黑炭对旱地土壤 CO_2、CH_4、N_2O 排放及其环境效益的影响[J]. 生态学报，2015, 35(11):3615-3624.
Gao D C, Zhang L, Liu Q, et al. Effects of biochar on CO_2, CH_4, N_2O emission and its environmental benefits in dryland soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3615-3624.
[27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. Soil agricultural chemical analysis method [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
[28] 余泺，高明，黄利玲，等. 施用氮肥对砖红壤硝态氮和盐基离子淋失特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2013, 19(3):698-704.
Yu L, Gao M, Huang L L, et al. Effects of nitrogen fertilization on leaching characteristics of NO_3^--N and base cations in latosol[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(3): 698-704.
[29] 罗微，林清火，林钊沐，等. 钾肥在砖红壤中的淋失特征初步模拟研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 93-96.
Luo W, Lin Q H, Lin Z M, et al. Preliminary stimulated study on leaching of potassium in latosol[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(6): 93-96.
[30] 罗微，林清火，茶正早，等. 氮肥品种对砖红壤中钾素淋溶特征的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6):74-77.
Luo W, Lin Q H, Cha Z Z, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on leaching characteristics of potassium in latosol[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(6): 74-77.
[31] 林清火. 砖红壤中氮钾的淋溶特征研究[D]. 西南农业大学, 2004.
Lin Q H. Study of nitrogen and potassium leaching in the latosol[D]. Agricultural University Of Southwest, 2004.
[32] 董艳红，王火焰，周健民，等. 不同土壤钾素淋溶特性的初步研究[J]. 土壤, 2014(2): 225-231.
Dong Y H, Wang H Y, Zhou J M, et al. Preliminary study on potassium leaching characteristics of different soils[J]. Soils, 2014, 46(2): 225-231.
[33] 占丽平，李小坤，鲁剑巍，等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 548-553.
Zhan L P, Li X K, Lu J W, et al. Research advances on influence factors of soil potassium movement[J]. Soils, 2012, 44(4): 548-553.

chinaXiv:201801.00057v1

ChinaXiv合作期刊

[34] 凌大炯，章家恩，黄倩春，等. 模拟酸雨对砖红壤盐基离子迁移和释放的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 444-450.
Ling D J, Zhang J E, Huang Q C, et al. Influences of simulated acid rain on leaching and release of base ions in latosol[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 444-450.
[35] 林清火，罗微，屈明，等. 尿素在砖红壤中的淋失特征Ⅱ—NO_3^--N 的淋失[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4): 638-642.
Lin Q H, Luo W, Qu M, et al. Leaching characters of NO_3^--N in latosol after applying ureaⅡ. loss of NO_3^--N by Leaching[J]. Journal of Agro-environmental Science, 2005, 24(4): 638-642.
[36] 邢承华，章永松，林咸永，等. 饱和铵贮库施肥法对降低土壤氮素挥发和淋失的作用研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(2): 155-161.
Xing C H, Zhang Y S, Lin X Y, et al. Study on decreasing ammonia volatilization and leaching rates by NDSA fertilization method[J]. Journal Of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2006, 32(2): 155-161.
[37] Chappell M A, Evangelou V P. Influence of added K^+ on inducing ammonium fixation and inhibiting nitrification.[J]. Soil Science, 2000, 165(5): 420-426.
[38] Di H J, Cameron K C. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on potassium, magnesium and calcium leaching in grazed grassland[J]. Soil Use and Management, 2004, 20(1): 2-7.
[39] Di H J, Cameron K C. Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 109(3-4): 202-212.
[40] 王飞，林诚，李清华，等. 不同施肥措施提高南方黄泥田供钾能力及钾素平衡的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 669-677.
Wang F, Lin C, Li Q H, et al. Increase effect of potassium supply and balance of yellow paddy soils through long-term different fertilization modes[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(3): 669-677.
[41] 周旋，吴良欢，戴锋. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田水稻养分累积及利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1495-1507.
Zhou X, Wu L H, Dai F. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on nutrient uptake and use efficiency of rice in yellow clayey field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1495-1507.

chinaXiv:201801.00057v1